干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于CLDAS融合降水的中国降雨侵蚀力研究

梁宇靖[1]， 沈润平[1]， 师春香[2]， 邢雅洁[1]， 孙 帅[2]
（1. 南京信息工程大学地理科学学院，江苏 南京 210044；2. 国家气象信息中心，北京 100081）

摘 要：气象站和卫星降雨资料估算降雨侵蚀力时存在无法反映空间异质性且精度差的问题，基于CLDAS多源融合降水，利用EI_{60}模型从不同的时空尺度对中国的降雨侵蚀力进行评估，并结合降雨量、侵蚀性降雨次数、侵蚀密度等指标，探讨降雨对土壤侵蚀的潜在作用。结果表明：(1) CLDAS降雨侵蚀力与地面实测数据在不同的时间尺度均有良好的回归关系，相关系数达到0.8以上，与CMORPH降雨侵蚀力相比，其相对误差显著降低，可以准确反映全国范围的降雨侵蚀力季节性变异。(2) 在2001—2020年，不同雨量区的降雨侵蚀力、降雨量和侵蚀性降雨次数的变化趋势基本一致，高雨量区的年际变化波动剧烈，侵蚀性降雨次数和暴雨过程协同影响降雨侵蚀力的大小。(3) 空间上，中国的降雨侵蚀力值的特点为东南沿海地区高、西北内陆地区低。时间上，侵蚀性降雨集中在5—8月，夏、秋两季对土壤造成的侵蚀影响更大。(4) 通过对年降雨量、年侵蚀密度和年暴雨量进行分区定量分析，结果表明暴雨量与侵蚀密度成正相关关系，即年降雨量一定，暴雨事件越多，降雨侵蚀密度越大。

关 键 词：降雨侵蚀力；EI_{60}模型；CLDAS多源融合降水
文章编号：

众所周知，降水是导致水土流失的重要原因之一，其主要通过雨滴落入地表，产生汇流冲刷表层土壤，从而对地形和土壤结构产生破坏，最终导致土壤颗粒物和有机物等营养物质随雨水流失[1]。降雨侵蚀力是水土流失重要的外在驱动因素，可以反映降雨强度、降雨历时、降雨频次等指标对土壤侵蚀的贡献程度，准确估算该参数能够为区域土壤侵蚀危险程度的评估奠定基础，可有效提高对区域土壤侵蚀程度预报的准确性[2]。

降雨是一种复杂的自然现象，这使得降雨侵蚀力的直接观测成为一大难点，目前对于降雨侵蚀力的估算主要通过地面气象站和卫星降雨资料结合不同的模型获得，而对于降雨侵蚀力的分析则主要侧重于在全国尺度或局地尺度进行时空研究、趋势分析等。胡琳等[3]利用陕西省的气象站点资料采用反距离权重空间插值方法绘制了全省的侵蚀力空间分布图，结果表明降雨侵蚀力在不同季节间的差异较大，陕西北部和关中地区主要在7—9月发生水土流失。殷水清等[4]基于气象站逐日降水数据估算得到全国的降雨侵蚀力，并利用克里金插值方法得到时空连续的结果，其中侵蚀力最高值在广东东兴，为$2×10^4$ MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，青海小灶火的侵蚀力最低，仅为3 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。伊力哈木[5]利用38个气象站资料分析了新疆维吾尔自治区的降雨侵蚀力空间变化特征，降雨侵蚀力总体呈上升趋势，与降雨量的空间分布基本一致，大致呈现中部高、南北低的态势，气候和海拔高度是影响新疆地区侵蚀力格局的主导因素。

随着遥感技术的发展，卫星降雨产品为降雨侵蚀力的计算提供了新的思路[6]。Vrieling等[7]利用TRAMM（Tropical rainfall measuring mission）降雨数据分析了非洲降雨侵蚀力的时空变化，并对IMERG

收稿日期：2022-01-12； **修订日期**：2022-03-04
基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC1506602）；国家自然科学基金重点项目（42161054）；国家气象信息中心结余资金项目（NMICJY202106）资助
作者简介：梁宇靖（1996-），男，硕士研究生，主要从事多源数据融合方面的研究. E-mail: 532268865@qq.com
通讯作者：沈润平（1963-），男，博士，教授，主要从事陆面过程遥感与模拟研究. E-mail: rpshen@nuist.edu.cn

(Integrated multi-satellite retrievals for GPM)、CMORPH等30 min分辨率的卫星降水产品在降雨侵蚀力方面的研究作出展望。王凯等[8]使用订正后的TRMM3B42降水数据计算中国的降雨侵蚀力,评估指标表明TRMM侵蚀力在不同的空间尺度上均有良好的适用性。黄进平[9]采用章文波公式[10]将IMERG数据应用在甘肃地区的降雨侵蚀力研究中,并结合随机森林进行降尺度,验证了该数据集具有较高的准确性。Kim等[11]在CMORPH降雨数据集的基础上,采用EI_{30}模型对美国地区的降雨侵蚀力进行估算,得出CMORPH对沿海地区的降雨侵蚀力存在低估现象,对于站点稀疏的地区能够较好地反映其降雨侵蚀状况。

综上所述,已有的降雨侵蚀力研究主要存在以下2个问题:(1)使用气象站数据计算降雨侵蚀力仅能反映站点附近有限区域的侵蚀状况,而在进行大尺度计算时存在空间分异性的问题[12]。卫星降雨资料具有空间覆盖范围广,捕捉降水连续时空变化的特性,特别是在站点稀疏区具有明显的优势,但它作为一种间接测雨方法,受传感器性能、反演算法等限制,在测量过程中易产生误差,估算的降雨侵蚀力精度有限[13]。(2)受降雨资料获取的限制,前人对于降雨侵蚀力的研究多是在局地尺度进行,且缺乏对中国近20 a来长序列降雨侵蚀力的深入分析。在少有的针对全国尺度的研究中,多是采用站点估算和插值结合获得降雨侵蚀力的空间分布,未考虑站点稀疏区降雨侵蚀力估算的问题,而在使用卫星数据的相关研究中则无法避免该资料精度低的缺陷。

基于以上存在的问题,本次研究使用国家气象信息中心研制的CLDAS多源融合降水数据集,通过EI_{60}模型对中国的降雨侵蚀力进行估算,从不同的时间、空间尺度评估CLDAS降雨侵蚀力的整体精度,并结合降雨量、侵蚀性降雨次数和侵蚀密度,对研究区的降雨侵蚀力特征进行分析,为中国区域的水土保持研究以及实践工作提供科学参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 CLDAS多源融合降水 国家气象信息中心Sun等[14]使用多重网格变分分析方法[15],以CMORPH卫星降水资料和美国航空航天局研发的MERR2(Modern-Era retrospective analysis for research and applications, Version 2)再分析降水资料为联合背景场,融合2400多个国家级站点观测数据和6×10^4多个区域自动站的降水数据制作了一套空间分辨率为6.25 km×6.25 km,时间分辨率为1 h的多源融合降水产品CLDAS-prcp(CLDAS Multi-source precipitation fusion dataset over China),该数据可通过国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)申请下载,本研究所用资料的时序长度为2001—2020年。

1.1.2 地面气象站数据 地面气象站资料来自国家气象信息中心2001—2020年中国国家级地面气象站逐小时降水数据,可从国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)申请下载。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨侵蚀力计算 降雨侵蚀力计算采用Wischmeier经典算法公式[16]:

$$R = 1/n\sum_{i=1}^{n}\left[\sum_{j=1}^{m_i}(EI_{30})_j\right] \quad (1)$$

式中:R为年平均降雨侵蚀力因子($MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$);$n$为计算$R$值的总年数;$m_i$为第$i$年内的侵蚀性降雨次数;$E$为次降雨总动能($MJ\cdot hm^2$);$I_{30}$为次降雨最大30 min雨强($mm\cdot h^{-1}$);文章中的$I_n$表示最大$n$分钟雨强($mm\cdot h^{-1}$)。

由于CLDAS融合降水的时间分辨率为60 min,故本研究参考Yue等[17]对小时降水提出的改进公式:

$$R = 1/n\sum_{i=1}^{n}\left[\sum_{j=1}^{m_i}(EI_{60})_j\right]\times 1.871 \quad (2)$$

降雨总动能E通过以下公式计算:

$$E = \sum_{k=1}^{m} e_k p_k \quad (3)$$

式中:m为将一次侵蚀性降雨分成m阶段(侵蚀性降雨的划分标准是单次降雨过程的降雨量达到12.70 mm);e_k为第k个阶段的单位降雨动能($MJ\cdot hm^2\cdot mm^{-1}$);$p_k$为第$k$个阶段的降雨量(mm)。

每个阶段的单位降雨动能(e)的计算公式如下[18]:

$$e = 0.29(1 - 0.72e^{-0.082i}) \quad (4)$$

式中:i为每个阶段内的降雨强度($mm\cdot h^{-1}$)。

1.2.2 侵蚀密度 侵蚀密度(ED,$MJ\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}$)是降雨侵蚀力与降雨量的比值,反映的是单位雨量的侵蚀强度[19]。

$$ED = R/P \quad (5)$$

式中:R为降雨侵蚀力值($MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}$);$P$为降雨量(mm)。

1.2.3 降雨侵蚀力评估 根据气象观测站的经纬度(图1)，将各站点匹配至CLDAS降雨侵蚀力格点上，采用双线性插值提取出降雨侵蚀力值，利用皮尔逊相关系数(r)、相对误差(BIAS)指标评估CLDAS降雨侵蚀力数据的精度。利用皮尔逊相关系数描述降雨侵蚀力值与真值之间的吻合程度；利用相对误差描述降雨侵蚀力的误差特征。具体公式如下：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(C_i-\bar{C}\right)\left(G_i-\bar{G}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(C_i-\bar{C}\right)^2\sum_{i=1}^{N}\left(G_i-\bar{G}\right)^2}} \tag{6}$$

$$\mathrm{BIAS}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(C_i-G_i\right)}{\sum_{i=1}^{N}G_i}\times 100\% \tag{7}$$

式中：N为样本数目；C_i为CLDAS降雨侵蚀力值；$\bar{C}$为CLDAS降雨侵蚀力的平均值；G_i为实测降雨侵蚀力值；$\bar{G}$为站点的实测降雨侵蚀力平均值。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力计算结果分析

2.1.1 降雨侵蚀力精度分析 图2a~d为CLDAS降雨侵蚀力和站点侵蚀力在季节尺度的散点图，根据二者的一元线性回归，CLDAS降雨侵蚀力整体上略低于地面站数据，但其相关系数均达到0.80以上，表现出良好的线性关系，春、夏、秋季的相关系数达到0.90以上，而冬季由于固态降水观测的误差大，其相关系数低于其他季节，为0.82。从相对误差来看，春季的误差最低，为24.67%，冬季的误差最大，为33.40%，其次是夏季和秋季，分别为29.71%和32.30%。总体上，在降雨丰富的季节，CLDAS降雨侵蚀力的适应性较好，可以准确呈现出降雨侵蚀力的季节性变化。

图2e~f为CLDAS降雨侵蚀力和站点侵蚀力在月尺度、年尺度的一元线性回归，其中月尺度的相关系数达到了0.92，相对误差为29.85%；年尺度的相关系数为0.96，相对误差为28.80%。由于降水数据在月尺度上的随机误差普遍高于年尺度，同时误差会随着模型传递，从而影响最终的降雨侵蚀力结果，因此年尺度的降雨侵蚀力精度总体优于月尺度。

Kim等[11]利用CMORPH卫星降水产品对美国地区的降雨侵蚀力进行评估，结果表明CMORPH年降雨侵蚀力的相关系数为0.80，相对误差为64.00%，CLDAS降水在CMORPH资料的基础上经过站点融合后，使得降雨侵蚀力的相对误差显著降

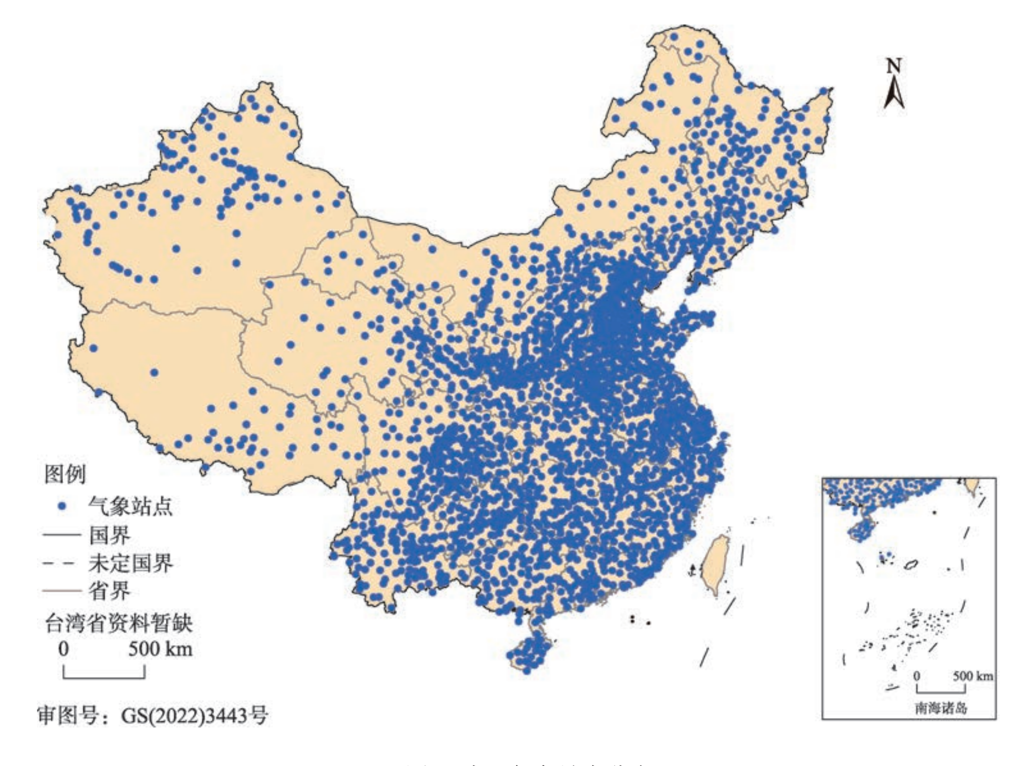


图1 中国气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in China

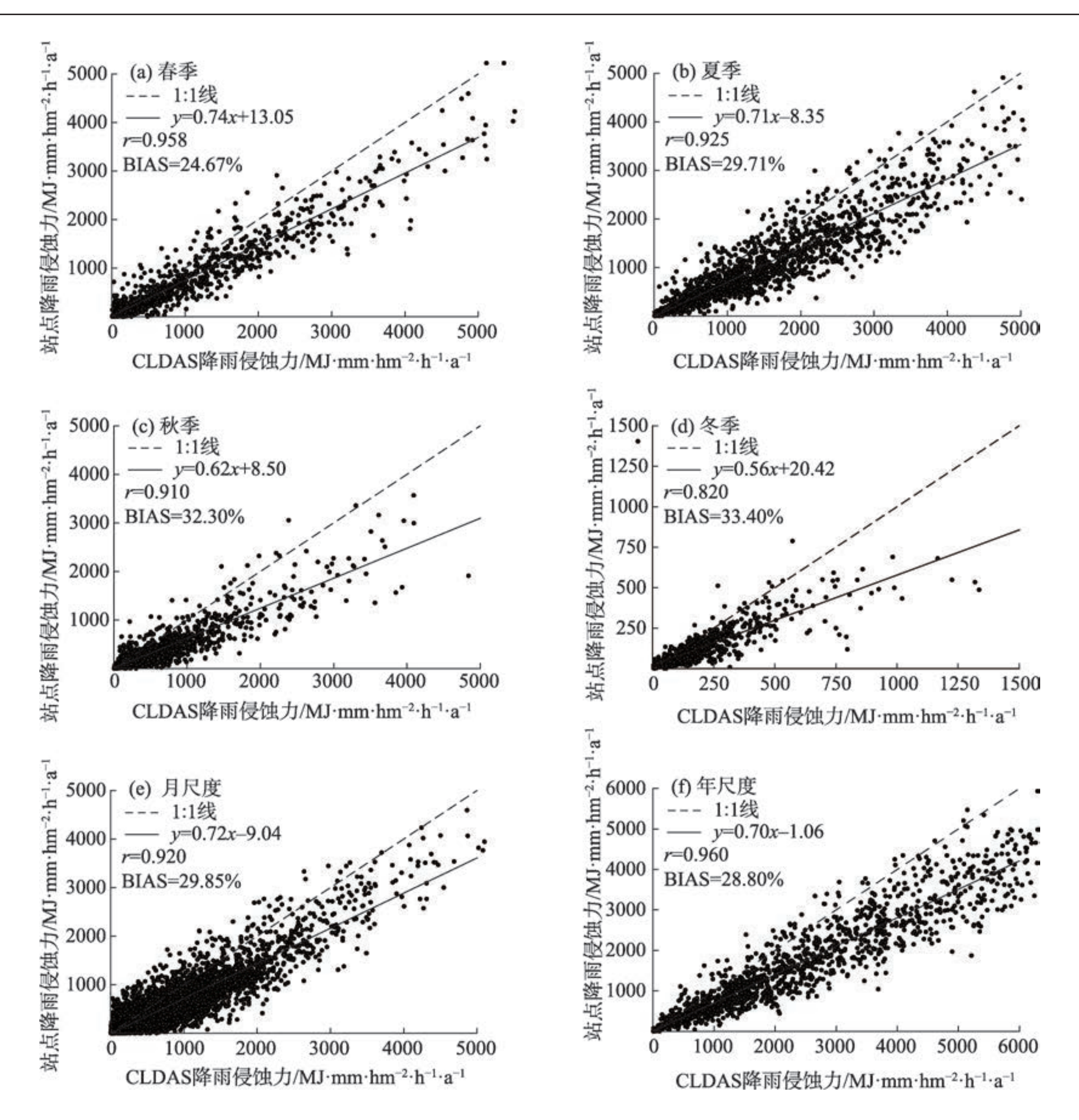


图2 站点降雨侵蚀力与CLDAS降雨侵蚀力在春、夏、秋、冬季以及月尺度、年尺度的线性回归

Fig. 2 Linear regressions of weather station rainfall erosivity and CLDAS rainfall erosivity in spring, summer, autumn and winter, as well as monthly and annual scales, respectively

低，相关系数从0.80提升至0.96。

综上，CLDAS降雨侵蚀力在不同的时间尺度上均有较好的精度，能够克服气象站和卫星降雨资料各自存在的不足，对于揭示降雨侵蚀力的时空变化和精确估算土壤侵蚀等方面具有显著优势。

2.1.2 年降雨侵蚀力分析 图3a~c为年降雨侵蚀力、年降雨量、年侵蚀性降雨次数在2001—2020年的变化趋势。由于中国不同地区的地形和气候存在差异，使得各区域的降雨量和降雨强度等表现不同，本文以年降雨量<400.00 mm、400.00~800.00 mm、>800.00 mm为标准，将我国划分为低、中、高3个不同的雨量分区，分析在不同的雨量条件下各指标的变化情况。

总体上3个雨量区的年降雨侵蚀力、年降雨量和年侵蚀性降雨次数的变化趋势基本一致。在低雨量区（<400.00 mm），年降雨侵蚀力为98~549 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，年降雨量为162.00~225.00 mm，年侵蚀性降雨次数为3~6次；在中雨量区（400.00~800.00 mm），年降雨侵蚀力为649~947 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，年降雨量为536.72~579.84 mm，年侵蚀性降雨次数为10~15次。由图3a~c可知，3个指标在低雨量区和中雨量区的变化幅度基本稳定，而在高雨量区的年际波动剧烈。

在高雨量区，降雨侵蚀力最低为2853 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}（2003年），最高达到4250 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}（2008年）。同时，2003年的降雨量和侵蚀性

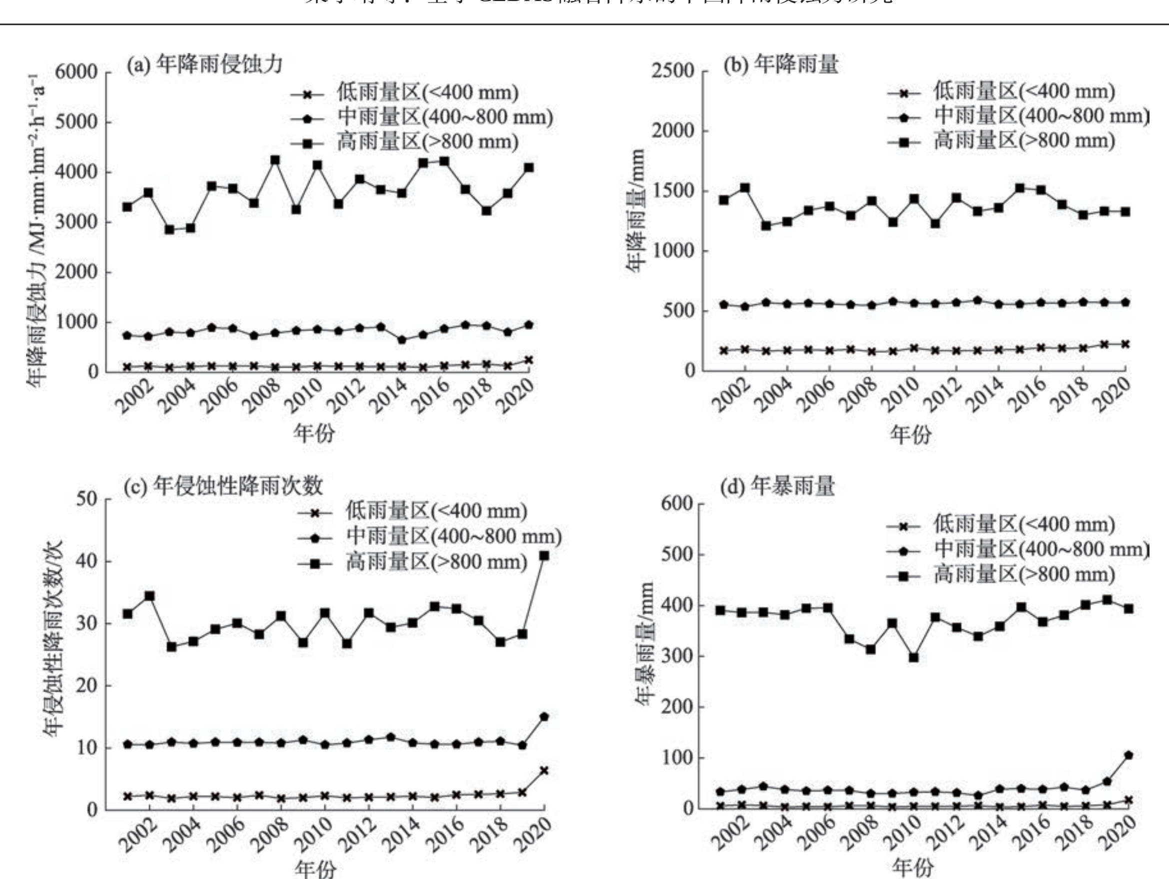


图3　2001—2020年的降雨侵蚀力、降雨量、侵蚀性降雨次数和暴雨量在不同雨量区的逐年变化

Fig. 3　Annual variation of rainfall erosivity, rainfall, erosive rainfall events and heavy rainfall in different rainfall zones from 2001 to 2020

降雨次数最低，分别为1211.54 mm和26次；2002年的降雨量最高，达到1529.67 mm；2020年的侵蚀性降雨次数最多，为41次。

高雨量区的部分年份呈现出低雨量、高侵蚀力的特征，如2020年和2016年的年降雨侵蚀力分别为4225 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$、4094 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$，但2020年的年均降雨量为1329.15 mm，比2016年减少了180.00 mm。根据图3c可得，2020年的侵蚀性降雨发生最为频繁，结合侵蚀力计算公式，其中60 min最大雨强对降雨侵蚀力的影响权重最高，说明2020年的降雨特点为历时短、强度大。

图3d为2001—2020年的逐年暴雨总量（24 h累积降水超过50.00 mm的降雨事件），其中2020年的暴雨量明显高于2016年，可印证前文2020年强降雨事件密集的结论。从全国尺度来看，2020年的暴雨量最多，而在高雨量区，2019年的暴雨趋势呈单峰状，主要原因是2019年受台风“利奇马”影响，长江、黄河等流域迎来最强暴雨，降雨总量达1336.9×10^8 m^3，对山东省[20]、浙江省等地区的水土流失造成严重影响。然而从图3a和图3c可知，2019年的侵蚀性降雨事件较少，同时该年的降雨侵蚀力整体低于其他年份，未出现类似2020年的高暴雨伴随高侵蚀力的现象。由此可见，降雨量一定时，侵蚀性降雨次数和暴雨过程协同决定降雨侵蚀力的大小。

2001—2020年的多年平均降雨侵蚀力分布特征如图4所示，降雨侵蚀力分布图的空间分辨率为6.25 km×6.25 km，平均降雨侵蚀力为1238 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$，标准差为1802 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$，降雨侵蚀力随空间位置而变化。总体上看，中国西部的降雨侵蚀力较低，东南沿海地区的降雨侵蚀力较高。内蒙古自治区、青海省、新疆维吾尔自治区、西藏自治区等内陆地区的降雨侵蚀力低于500 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$，而降雨侵蚀力高于5000 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$的地区主要分布在广西、广东、福建等沿海省份。我国的东北地区、中部地区和西南地区的降雨侵蚀力大部分为1000~5000 $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$。从表1可知我国各省份（地区）的年均侵蚀力及其变化范围，台湾省、香港、澳门、海南省显著大于

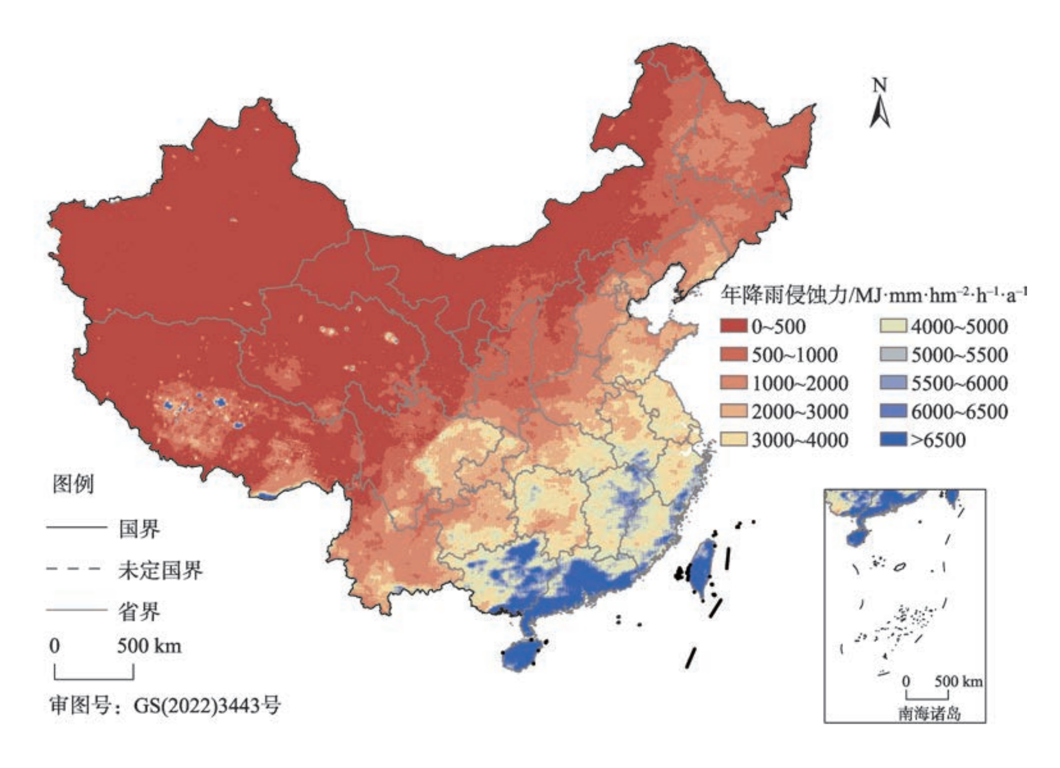


图4　2001—2020年中国年降雨侵蚀力空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of annual rainfall erosivity in China from 2001 to 2020

表1　2001—2020年中国各省份(地区)年降雨侵蚀力

Tab. 1　Annual rainfall erosivity in each province (region) of China from 2001 to 2020

省份(地区)	年降雨侵蚀力/MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}		省份(地区)	年降雨侵蚀力/MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}	
	范围	平均值		范围	平均值
北京市	334~2777	1552	湖南省	1529~6013	3405
天津市	1517~3232	2042	广东省	2573~15716	7009
河北省	140~3100	1153	广西省	2003~16295	5331
山西省	211~1805	620	海南省	2947~12717	8710
内蒙古	1~1642	348	重庆市	1424~4811	2616
辽宁省	383~4121	1615	四川省	73~5678	1488
吉林省	391~2071	859	贵州省	678~5935	27908
黑龙江省	223~2198	834	云南省	159~6715	1674
上海市	2423~4399	3371	西藏	2~53718	583
江苏省	2085~5533	3490	陕西省	229~3599	878
浙江省	1642~7449	4129	甘肃省	0~2314	228
安徽省	1802~8002	3549	青海省	0~16551	309
福建省	2597~8529	4713	宁夏	60~1016	251
江西省	2728~7664	4587	新疆	0~10163	63
山东省	1307~4077	2382	台湾	3207~14078	7966
河南省	494~4030	1840	香港	2928~9190	5771
湖北省	719~5702	2763	澳门	6364~12119	8747

其他省市,平均侵蚀力为5000~12000 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1},其次是广东省、福建省等沿海省份。

综上,年降雨侵蚀力的空间分布大致以400.00 mm等降水量线划分,此线以西以北的地区深处内陆,降水稀少,因此侵蚀力较小,均小于500 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1},同时年际间的变化相对稳定;此线

以东以南的地区，年降雨侵蚀力较大，且变率也大。

2.1.3 月降雨侵蚀力分析 图5、图6分别为2001—2020年1—6月和7—12月的逐月降雨侵蚀力。冬季(12、1、2月)，除沿海省份外，中国的大部分地区以固态降水为主，发生强降雨的频次很低，所以冬季大范围内的降雨侵蚀力小于25 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}；但在气候较为湿润的东南沿海地区(浙江省、福建省等)，侵蚀性降雨的出现导致相对较高的降雨侵蚀力。春季(3、4、5月)，我国华南地区在副热带高压脊雨带影响下进入雨季，发生强降雨的频次增多，降雨侵蚀力也逐渐增大，如广东省、广西省等地区，降雨侵蚀力相较于冬季有明显的增强趋势。

随着副高压辐散的暖湿气流不断向北移动，我国长江中下游地区5月底—6月初进入雨季，降雨的强度和范围也大幅增加，如湖南省、湖北省、安徽省等地区，降雨侵蚀力大于650 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。北太平洋副热带高压的不断北移导致锋面区域形成的降雨带向北移动，直到7、8月在黄河、淮河流域

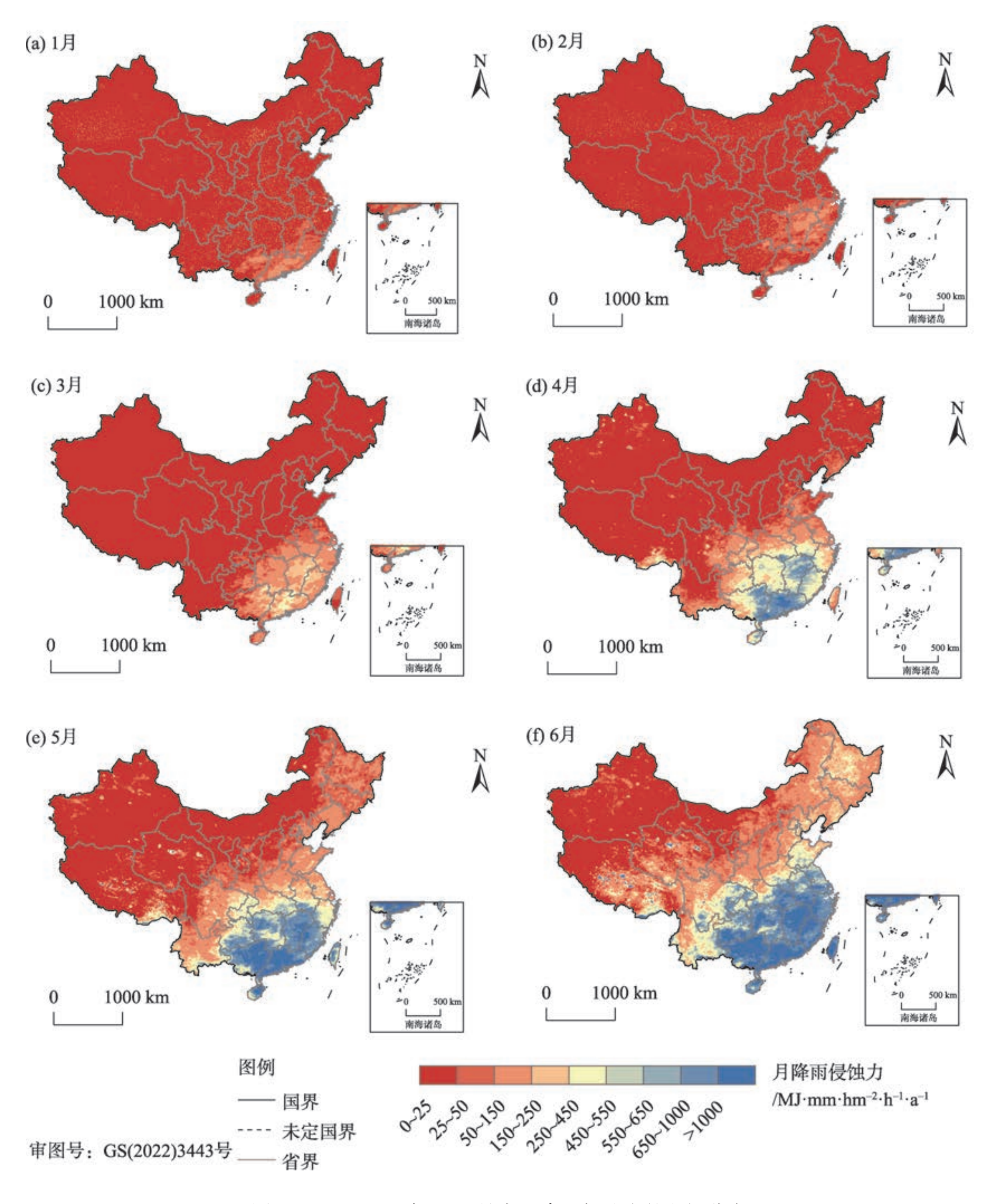


图5 2001—2020年1—6月中国降雨侵蚀力的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of rainfall erosivity in China in January-June from 2001 to 2020

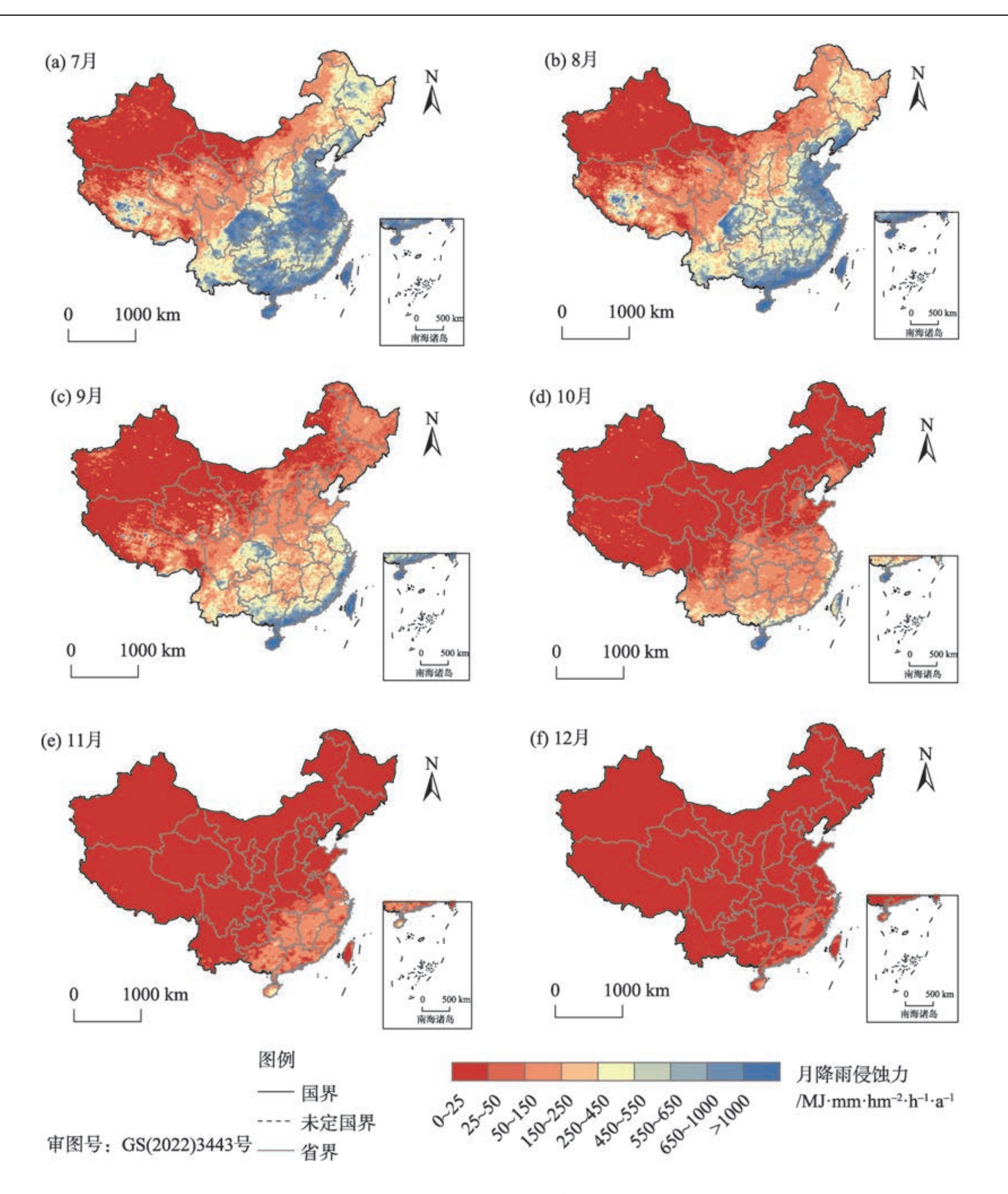


图6 2001—2020年7—12月中国降雨侵蚀力的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of rainfall erosivity in China in January-June from 2001 to 2020

停滞，造成多次的、大范围的强降雨。进入华北雨季，月降雨侵蚀力急剧增加，尤其是在东北、华北以及华中的部分地区，如山西省、山东省、河北省等地区的降雨侵蚀力超过450 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。10月，随着副热带高压的迅速南退，我国雨季随之结束，发生强降雨事件的频次大大减少，此时我国以西以北降雨侵蚀力大部分小于25 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，以东以南的地区降雨侵蚀力小于150 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，总体上降雨侵蚀力的空间分布仍呈现东南高、西北低的特点。

2.2 侵蚀密度结果分析

2.2.1 年侵蚀密度分析 2001—2020年的侵蚀密度如图7a所示。中国的年侵蚀密度值为1.40 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，东南沿海地区部分省份的年侵蚀密度达到3.50 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}以上，如广东省、海南省、台湾省等地区。华中和华东地区非沿海省份的侵蚀密度多稳定在2.30~5.00 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}之间，华北地区的侵蚀密度为0.45~1.50 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。

表2为各省份(地区)的年均降雨量、年均侵蚀密度和年均暴雨量。海南省的年均侵蚀密度、年均

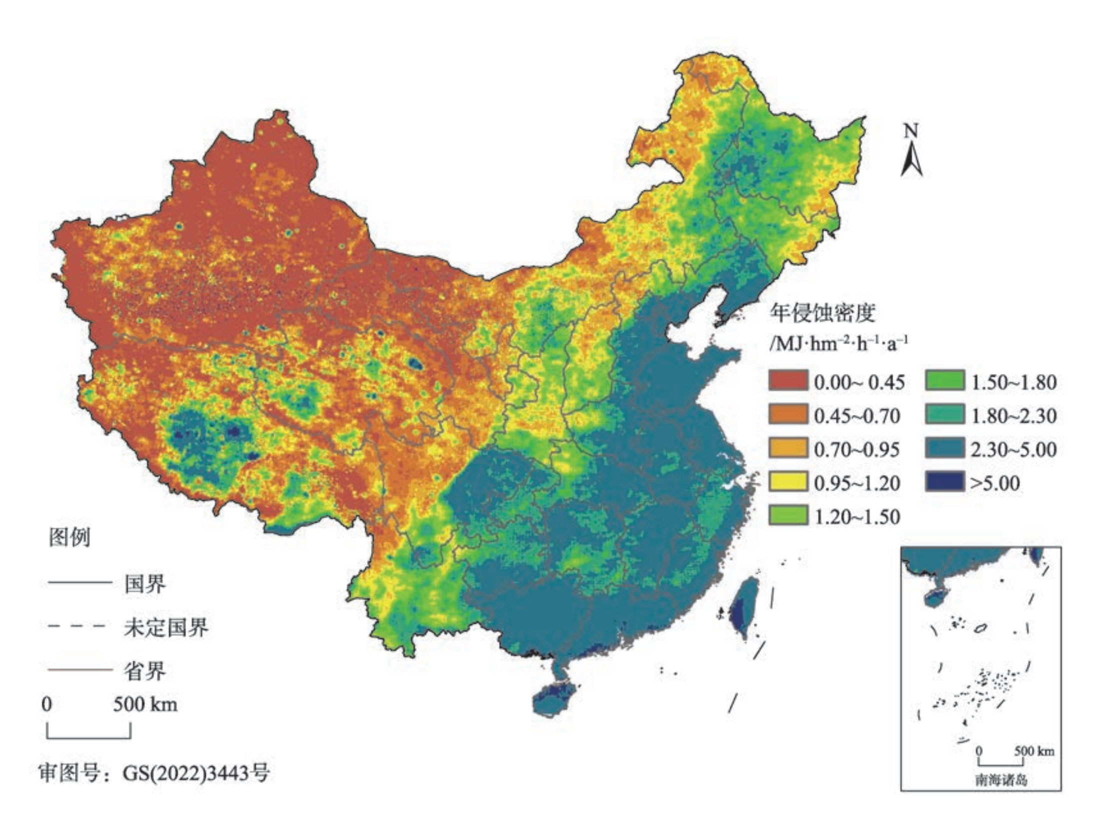


图7 2001—2020年中国年侵蚀密度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of annual erosivity density in China from 2001 to 2020

表2 2001—2020年中国各省份(地区)年均降雨量、年均侵蚀密度、年均暴雨量

Tab. 2 Average annual rainfall, average annual erosion density, and average annual heavy rainfall by province (region) in China from 2001 to 2020

省份(地区)	年均降雨量/mm	年均侵蚀密度/MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}	年均暴雨量/mm	省份(地区)	年均降雨量/mm	年均侵蚀密度/MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}	年均暴雨量/mm
北京市	553.58	2.75	75.19	湖南省	1452.26	2.33	233.48
天津市	556.38	3.67	93.98	广东省	1889.15	3.66	503.05
河北省	496.50	2.20	52.62	广西省	1613.90	3.26	361.97
山西省	498.18	1.22	29.05	海南省	1910.84	4.55	619.89
内蒙古	294.58	1.06	11.88	重庆市	1197.47	2.18	179.20
辽宁省	653.05	2.41	107.45	四川省	900.14	1.47	88.83
吉林省	600.07	1.46	43.84	贵州省	1169.93	2.33	158.69
黑龙江省	550.93	1.50	34.57	云南省	1092.31	1.47	81.70
上海市	1305.19	2.58	231.82	西藏	388.74	1.08	29.14
江苏省	1112.86	3.18	237.27	陕西省	651.67	1.32	53.28
浙江省	1686.28	2.44	297.65	甘肃省	287.51	0.63	7.61
安徽省	1266.17	2.82	261.37	青海省	329.23	0.84	8.62
福建省	1764.18	2.68	352.82	宁夏	291.60	0.86	8.48
江西省	1734.80	2.63	327.61	新疆	140.19	0.47	1.83
山东省	704.64	3.37	147.78	台湾	1709.28	4.62	711.58
河南省	764.97	2.34	123.28	香港	1624.13	3.51	468.18
湖北省	1155.33	2.34	191.13	澳门	1943.85	4.36	538.17

降雨量和年均暴雨量最高，分别为4.55 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}、1910.84 mm和619.89 mm，新疆维吾尔自治区的年均侵蚀密度最低，为0.47 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，同时其年均降雨量也最低。贵州省和云南省的年均降雨量差异小，分别为1169.93 mm和1092.31 mm，年均侵蚀密度为2.33 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}和1.47 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，前者的降雨量是后者的1.07倍，但年均侵蚀密度是1.58倍，由此可得出，贵州省的单位降雨量能带来较高的降雨侵蚀力。从两省的暴雨量可知，贵州省的年均暴雨量为158.69 mm，云南省的年均暴雨量为81.7 mm，两者的比例为1.93∶1.00，说明年均暴雨量对年均侵蚀密度的影响更敏感。结合侵蚀密度图(图7)分析，贵州省的侵蚀密度更高、范围更广，因此降雨侵蚀力更大，具有这种关系的省份还有辽宁省和吉林省，两省的年均降雨量分别为653.05 mm和600.07 mm，但年均侵蚀密度差异显著，分别为2.41 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}和1.46 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，而对应的年均暴雨量分别为107.45 mm和43.84 mm。综上可知，暴雨量越高，侵蚀密度越大。

2.2.2 季节侵蚀密度分析 由季节侵蚀密度图(图8)可知，不同季节的侵蚀密度空间分布差异较大。春季，东南沿海省份以及湖南省、贵州省、江西省的侵蚀密度大于1.80 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，江苏省、安徽省等地区的侵蚀密度在1.20~1.80 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}之间浮动，全国的平均侵蚀密度为0.85 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，标准差为1.44 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。夏季，侵蚀密度高值区迅速扩张，平均侵蚀密度为1.81 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，标准差为1.19 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，华东、华中以及东北地区的侵蚀密度高于2.30 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。秋季，四川省东部和东南沿海地区的侵蚀密度为2.30~5 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，海南省和台湾省的局部地区超过5.00 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，全国平均侵蚀密度为0.88 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，标准差为0.92 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。冬季，由于西伯利亚冷高压控制，全国的侵蚀密度整体下降，低于1.50 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，平均侵蚀密度为1.10 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，标准差为1.27 MJ·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}。Renard等[21]研究发现，季节侵蚀密度与30 min雨强成正比，可反应降雨强度的季节性变化，总体上夏季

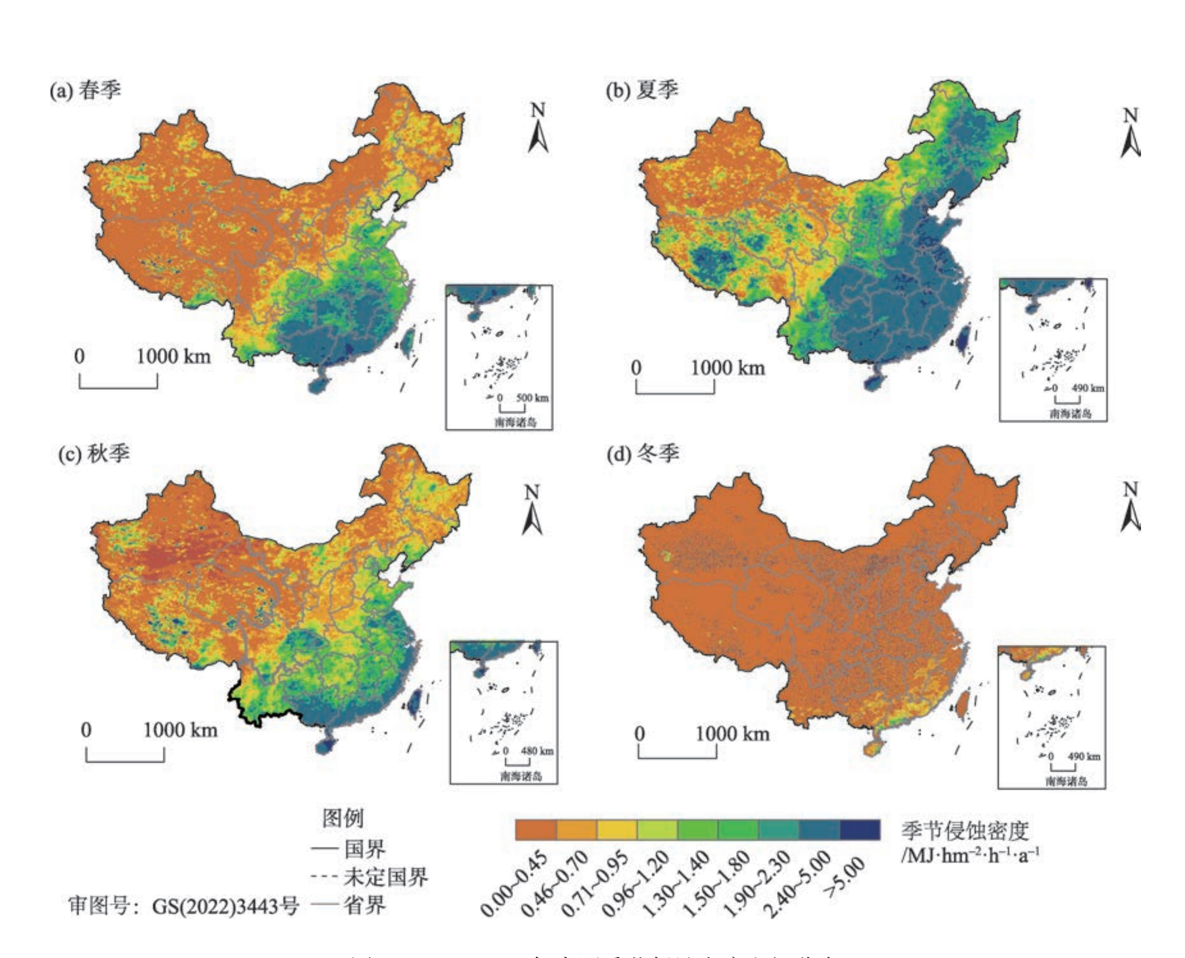


图8 2001—2020年中国季节侵蚀密度空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of seasonal erosivity density in China from 2001 to 2020

的侵蚀密度最高，春季和秋季次之，冬季最低。

当侵蚀密度大于1 $MJ \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$时，单位降雨量会带来较高的降雨侵蚀力，高侵蚀性的降水冲击长期干燥的土壤，通常会造成巨大的损害，同时有研究表明，降水集中程度增大会增加干旱发生的可能性[22]，因此本研究对于降雨量稀少但侵蚀密度高且植被覆盖度低地区的土壤侵蚀防护工作具有指示意义。

3 讨 论

气象站观测目前仍是估算降雨侵蚀力的主流数据，然而站点资料虽精度高但不适用于大区域范围内的降雨侵蚀力估算，它仅能反映站点附近区域的降水现状，卫星降雨产品虽能有效再现降水的时空分布，但受反演算法和传感器的影响，其精度一直是在各专业领域应用时的瓶颈。近10 a来，多源降水资料融合的理念为研发高精度的降水产品提供了新的思路，融合降水数据是通过一定的融合方法，在同一时空尺度上将站点观测数据、卫星降水产品、雷达降水产品等不同来源的降水资料进行融合，融合后的降水具有多种资料的优势，更加接近降水的真实空间分布[13]。CLDAS多源融合降水数据由国家气象信息中心自主研制，被国内外学者广泛应用在陆面模式[23]、山洪[24]以及干旱监测[25]等领域。本研究首次将CLDAS融合降水应用在降雨侵蚀力的研究中，并首次利用逐小时国家站数据评估CLDAS降雨侵蚀力的精度，为该数据集在土壤侵蚀中的应用提供参考依据。

估算降雨侵蚀力的模型主要分为雨强模型和简易模型[26]，雨强模型以Wischmeier经典算法模型[16]为代表，Wischmeier等[16]利用美国的35个水土保持站、8250个小区的降雨和侵蚀实测资料，以次降雨为单位，将降雨总动能(E)与30 min最大雨强(I_{30})的乘积EI_{30}作为降雨侵蚀力指标，此方法一直被各国学者作为标准法沿用，然而它一般需要高时间分辨率的降雨过程资料，且费时费力，对于长时间序列或大尺度区域范围内的降雨侵蚀力计算难以实现。由于日尺度、月尺度降雨资料的易获取性，章文波等[10]、王万中等[27]建立了简易估算模型，例如日雨量模型和月雨量模型，但这些模型大多是在雨强模型的基础上通过统计拟合出最优参数，往往在研究区内效果良好，而在研究区之外的范围适用性较低，例如日雨量模型在降雨量丰富的地区，计算得到的降雨侵蚀力误差相对小；在降雨量稀少的地区，模型计算的侵蚀力误差较大[10]，因此将简易模型应用在全国尺度存在一定的局限性[28]。本研究依靠国家气象信息中心高性能服务器，基于python开发了适用于CLDAS融合降水产品的EI_{60}模型，克服了雨强模型获取数据难和计算费时的问题，并能够在全国尺度展开长序列研究。

由于降雨侵蚀力逐年的时空变化显著，至少需要15 a以上的降水资料才能获取具有代表性的年降雨侵蚀力结果[21]。受降雨资料和计算资源的限制，以往对于全国尺度的降雨侵蚀研究仅分析单个年份的状况，难以在全国尺度展开长序列的降雨侵蚀力分析，本文使用20 a的融合降水资料估算中国的降雨侵蚀力，在长时间尺度上的结果更具有代表性。

此外，本文的研究还存在一些不足，多数卫星降水产品可能高估湖泊和水库区域的降水[11]，由于CLDAS融合降水以CMORPH为背景场，因此西部湖泊区域的降雨侵蚀力存在明显的高估现象，比较典型的有纳木错和色林错湖泊等。张黎明[29]等利用1997—2003年的自建气象站降雨资料，研究了不同降雨强度对估算侵蚀力的影响，结果表明$I_{10}>I_{15}>I_{30}>I_{60}$。因此CLDAS融合降水的时间分辨率仍有所不足，未来可利用分钟级的气象站观测资料对CLDAS融合降水进行时间降尺度[30]，提升其在降雨侵蚀力估算中的精度。

4 结 论

针对气象站和卫星降雨资料在降雨侵蚀力应用中存在无法反映空间异质性和数据精度差的问题，本文使用CLDAS多源融合降水数据结合地面气象站数据，采用EI_{60}模型，对中国的降雨侵蚀力进行分析评估，得出以下结论：

（1）CLDAS融合降水估算的降雨侵蚀力在全国范围内具有较好的适应性，与地面实测结果在不同的时间尺度具有良好的线性回归关系，相关系数均达到0.80以上，相对误差显著降低，可应用于长序列、大尺度范围内的降雨侵蚀力研究。

（2）2001—2020年，不同雨量区的年降雨侵蚀

力、年降雨量、年侵蚀性降雨次数的变化趋势基本一致。在低雨量区和中雨量区，3个指标逐年变化稳定，而在高雨量区的年际波动剧烈，侵蚀性降雨次数和暴雨过程协同影响降雨侵蚀力的大小。

（3）中国的降雨侵蚀力在空间上大致呈现出东南沿海地区高、西北内陆地区低的特征。时空上，全国的侵蚀性降雨集中在5—8月，各月之间的侵蚀力变化幅度大，年均降雨侵蚀力为1238 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}；以400.00 mm等降水量线划分，此线以西以北降水稀少，侵蚀力低，均小于500 MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1}，此线以东以南的地区受季风影响，降雨量增多，侵蚀力较高。

（4）通过对年降雨量、年侵蚀密度和年暴雨量进行分区定量分析，得出暴雨量与侵蚀密度成正相关即年降雨量一致时，暴雨量越高，侵蚀密度越大。

参考文献（References）

[1] Zhang G H, Nearing M A, Liu B Y. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River Basin of China[J]. Transactions of the Asae, 2005, 48(2): 511-517.

[2] 孙从建, 王佳瑞, 郑振婧, 等. 黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 568-576. [Sun Congjian, Wang Jiarui, Zheng Zhenjing, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity and its influencing factors in the protected area of the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 568-576.]

[3] 胡琳, 苏静, 桑永枝, 等. 陕西省降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1101-1107. [Hu Lin, Su Jing, Sang Yongzhi, et al. Spatial and temporal characteristics of rainfall erosivity in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1101-1107.]

[4] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 105-113. [Yin Shuiqing, Xue Xiaochan, Yue Tianyu, et al. Spatiotemporal distribution and return period of rainfall erosivity in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 105-113.]

[5] 伊力哈木·伊马木. 新疆维吾尔自治区1981—2018年降雨侵蚀力的空间变化特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 1-9. [Yimamu Yilihamu. Spatial variation of rainfall erosivity in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 1981 to 2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 1-9.]

[6] Pandey A, Mishra S K, Gautam A K. Soil erosion modeling using satellite rainfall estimates[J]. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering, 2015, 4(4): 325-318.

[7] Vrieling A, Hoedjes J C B, Velde M. Towards large-scale monitoring of soil erosion in Africa: Accounting for the dynamics of rainfall erosivity[J]. Global and Planetary Change, 2014, 115(5): 33-43.

[8] 王凯, 陈璐, 马金辉, 等. TRMM数据在中国降雨侵蚀力计算中的应用[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 948-959. [Wang Kai, Chen Lu, Ma Jinhui, et al. Calculation of rainfall erosivity in China with TRMM Data[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(5): 948-959.]

[9] 黄进平. 基于GPM数据的肃南地区降雨侵蚀力计算[J]. 陕西水利, 2020(11): 36-38. [Huang Jinping. Calculation of rainfall erosivity in Sunan Area based on GPM data[J]. Shaanxi Water Resources, 2020(11): 36-38.]

[10] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711. [Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.]

[11] Kim J, Han H, Kim B, et al. Use of a high-resolution-satellite-based precipitation product in mapping continental-scale rainfall erosivity: A case study of the United States[J]. Catena, 2020, 193: 104602, doi: 10.1016/j.catena.2020.104602.

[12] 徐静, 史明昌, 王晓云, 等. 辽宁省细河流域土壤侵蚀监测方法对比研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 103-107, 251. [Xu Jing, Shi Mingchang, Wang Xiaoyun, et al. Comparison of soil erosion monitoring methods in Xihe River Basin in Liaoning Province[J]. Water and Soil Conservation Bulletin, 2011, 31(2): 103-107, 251.]

[13] 熊立华, 刘成凯, 陈石磊, 等. 遥感降水资料后处理研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 627-637. [Xiong Lihua, Liu Chengkai, Chen Shilei, et al. Review of post-processing research for remote-sensing precipitation products[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 627-637.]

[14] Sun S, Shi C, Pan Y, et al. Applicability assessment of the 1998—2018 CLDAS multi-source precipitation fusion dataset over China[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4): 879-892.

[15] Xie Y, Koch S, Mcginley J, et al. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(4): 1224-1240.

[16] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285-291.

[17] Yue T, Yin S, Xie Y, et al. Rainfall erosivity mapping over mainland China based on high-density hourly rainfall records[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(2): 665-682.

[18] Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distributions[J]. Transactions of the Asae, 1987, 30(2): 379-386.

[19] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece[J]. Catena, 2016, 137: 161-172.

[20] 从辰宇, 韩剑桥, 焦菊英, 等. 台风"利奇马"暴雨引发的土壤侵蚀调查研究——以山东省临朐县为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 337-344. [Cong Chenyu, Han Jianqiao, Jiao Juying,

et al. Investigation on soil erosion from typhoon Lekima rainstorm: A case study in Linqu County, Shandong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 337-344.]

[21] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Texas: USDA, Agticutural Research Service, 1996: 23.

[22] 邱德勋, 穆兴民, 尹殿胜, 等. 大理河流域干旱变化特征及其与极端降水的关系[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1240-1249. [Qiu Dexun, Mu Xingmin, Yin Diansheng, et al. Variation characteristics of drought and its relationship with the extreme precipitation in Dali River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1240-1249.]

[23] 孟现勇, 王浩, 刘志辉, 等. 基于CLDAS强迫CLM3.5模式的新疆区域土壤温度陆面过程模拟及验证[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 979-995. [Meng Xianyong, Wang Hao, Liu Zhihui, et al. Simulation and verification of land surface soil temperatures in the Xinjiang Region by the CLM3.5 model forced by CLDAS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 979-995.]

[24] 刘松楠, 汪君, 王会军. 多源降水在门头沟山洪模拟中的应用及比较[J]. 气象, 2021, 47(7): 817-829. [Liu Songnan, Wang Jun, Wang Huijun. Application and comparison of multi-source rainfall data in the simulation of flash flood in Mentougou of Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(7): 817-829.]

[25] 孙小龙, 宋海清, 李平, 等. 基于CLDAS资料的内蒙古干旱监测分析[J]. 气象, 2015, 41(10): 1245-1252. [Sun Xiaolong, Song Haiqing, Li Ping. Analysis of drought monitoring in Inner Mongolia based on CLDAS data[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(10): 1245-1252.]

[26] 杨轩. 降雨侵蚀力模型研究进展[J]. 现代农业科技, 2019(14): 199-202, 206. [Yang Xuan. Computation method and application of rainfall erosivity[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(14): 199-202, 206.]

[27] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(I)[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 7-18. [Wang Wanzhong, Jiao Juying, Hao Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(4): 7-18.]

[28] Xie Y, Yin S, Liu B, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 547-558.

[29] 张黎明, 林金石, 于东升, 等. 我国南方地区降雨侵蚀力指标*R*的建立研究——以江西鹰潭地区为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 1-4. [Zhang Liming, Lin Jinshi, Yu Dongsheng. Establishment of index *R* in rainfall erosivity in south China: Taking the area of Yingtan as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(5): 1-4.]

[30] 师春香, 谢正辉. 基于静止气象卫星观测的降水时间降尺度研究[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 15-22. [Shi Chunxiang, Xie Zhenghui. A time downscaling scheme of precipitation by using geostationary meteorological satellite data[J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 15-22.]

Rainfall erosivity in China based on CLDAS fusion precipitation

LIANG Yujing[1], SHEN Runping[1], SHI Chunxiang[2], XING Yajie[1], SUN Shuai[2]

(1. College of Geosciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;
2. National Meteorological Information Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Rain gauge data is still the most popular data for estimating rainfall erosivity. However, although this precipitation data is highly accurate, it is not suitable for estimating rainfall erosivity on a large, regional scale. It can only reflect the situation of rainfall erosivity in the area surrounding the weather station. Although satellite imagery can reflect the spatial and temporal distribution of precipitation, its application in various professional fields is limited by its poor accuracy. Fusion precipitation data is produced by fusing precipitation data from different sources, such as station precipitation, satellite precipitation, and radar precipitation, all on the same spatial and temporal scales. The advantage of combining multiple sources is that it produces data that more closely represents the true spatial distribution of precipitation. With the high temporal resolution CMA land data assimilation system (CLDAS) fusion precipitation, this study uses the EI_{60} model to assess rainfall erosion in China on different spatial and temporal scales and to determine the potential role of rainfall on soil erosion by precipitation, erosive rainfall, and precipitation erosion density. The article draws the following conclusions: (1) CLDAS rainfall erosivity is slightly lower than the rain gauge results but presents a very good regression relationship with rain gauge erosivity, with high correlation coefficients at different time scales, and a lower margin of error than the rainfall erosivity from the Climate Prediction Center Morphing (CMORPH) technique, which can accurately reflect the rainfall erosivity variation on a national scale. (2) In different rainfall zones, trends in rainfall erosivity, rainfall volume, and the number of erosive rainfall events from 2001 to 2020 are generally consistent, with sharp inter-annual fluctuations in high rainfall zones. (3) Spatially, Chinese rainfall erosivity is characterized by high values in the southeast coastal areas and low values in the northwest inland areas. Temporally, erosive rainfall is concentrated from May to August. Rainfall in summer and autumn results in greater erosive impacts on the soil. (4) The quantitative analysis of annual rainfall, annual erosion density, and annual storms shows that storm and rainfall erosion density are positively correlated. In other words, the more rainstorm events there are, the higher the rainfall erosion density and rainfall erosivity. This study can serve as a scientific reference for theoretical research on soil erosion and soil conservation practices in China.

Key words: rainfall erosivity; EI_{60} model; CLDAS fusion precipitation